

В. О. ДІДЕНКО, аспірант НТУУ «КПІ», Київ;

О. Ф. БОНДАРЕНКО, канд. техн. наук, докторант НТУУ «КПІ», Київ

ЯКІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ГІДРОПРИВОДОМ МЕХАНІЗМУ ХИТАННЯ КРИСТАЛІЗАТОРА МБЛЗ

Вступ. Точна підтримка закону переміщення кристалізатора машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) має значний вплив на якість безперервно литих заготовок. Застосування механізмів хитання кристалізатора МБЛЗ із гідравлічним приводом відкриває більш широкі можливості керування параметрами процесу на відміну від електромеханічного приводу і, відповідно, дозволяє отримувати більш високу якість кінцевої продукції [1]. Відомо, що гідравлічний привод механізму хитання кристалізатору МБЛЗ є нелінійною системою [2, 3]. У зв'язку з цим заслуговують уваги питання оцінки якості функціонування таких систем при зміні параметрів режиму хитання, обумовлених технологією безперервного розливання сталі [4], та формування вимог щодо точності підтримки технологічних режимів хитання.

Постановка задачі. Метою роботи є оцінка якості функціонування системи гідравлічного приводу механізму хитання кристалізатора МБЛЗ за допомогою його математичної моделі, розробленої в [3], а також формування вимог до точності підтримки параметрів режиму хитання в таких системах.

Результати дослідження. Функціональна схема системи керування механізмом хитання слябової МБЛЗ представлена на рис. 1 [5]. Авторами [3] розроблена математична модель цієї структури, яку представлено на рис. 2. Модель гідроприводу виокремлено в блок 2. Сервоклапан, згідно його перехідної характеристики [6], представляється аперіодичною ланкою – блок 1 – з наступними параметрами: постійна часу $T_1 = 0,01$ с, коефіцієнт передачі $K_1 = 0,1$. Блоки 1 і 2 є об'єктом керування. Функцію стабілізації положення штока гідроциліндра виконує регулятор 3 на основі негативного зворотного зв'язку за положенням. Замкнена структура на рис. 2 представляє систему автоматичного керування (САК) гідроприводом механізму хитання кристалізатора МБЛЗ.

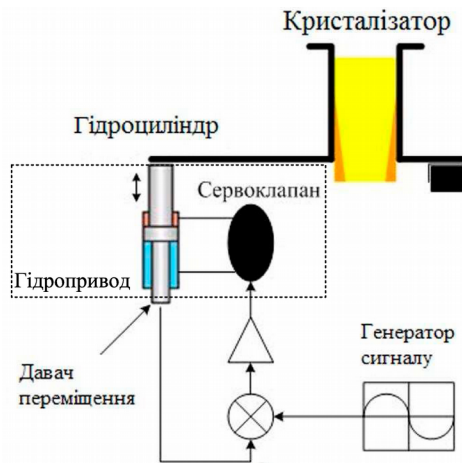


Рис. 1 – Функціональна схема системи керування механізмом хитання слябової МБЛЗ [5]

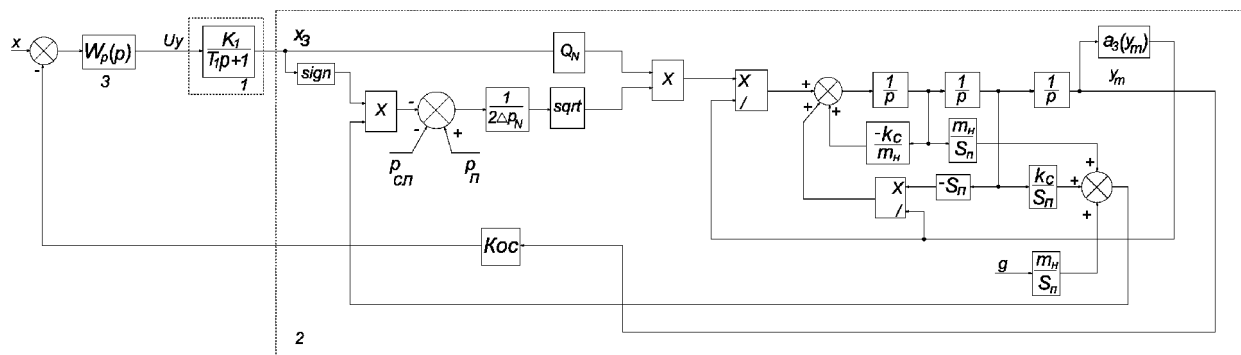


Рис. 2 – Структура САК гідроприводом механізму хитання кристалізатора МБЛЗ

Засобами Simulink була виконана лінеаризація блока 2 послідовно з'єднаними інтегруючою ланкою та ланкою другого порядку. Це дозволило представити об'єкт керування як лінійну систему і попередньо обрати коефіцієнт підсилення П-регулятора (блок 3) за умови забезпечення стійкості замкнутого контуру стабілізації переміщення. Необхідно відзначити, що також можливе застосування методів структурно-параметричної оптимізації, але, зважаючи на наявність в об'єкті змінних параметрів, неможливо гарантувати якісного функціонування замкнутої системи.

Результати моделювання під час відтворення сигналу переміщення нелінійною системою показані на рис. 3. При цьому параметри сигналу завдання є такими: амплітуда – 3 мм; частота – 2 Гц; коефіцієнт несинусоїдальності – 0,7.

Для оцінки якості функціонування системи автоматичного керування гідроприводом було використано наступний інтегральний показник якості:

$$I = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} |x(t) - y_m(t)| dt, \quad (1)$$

де T – період сигналу хитання; t_1 – момент часу, при якому вільна складова перехідного процесу в замкненій системі наближається до нуля (на рис. 3 – 1,5 с). Цей показник характеризує якість функціонування системи як за лінійного, так і за коливального перехідного процесу. Для подібних задач також широко використовується квадратичний критерій, однак через піднесення до квадрату сигналу похибки великі відхилення набувають у кінцевому значенні інтегралу істотно більшу вагу, ніж малі [7].

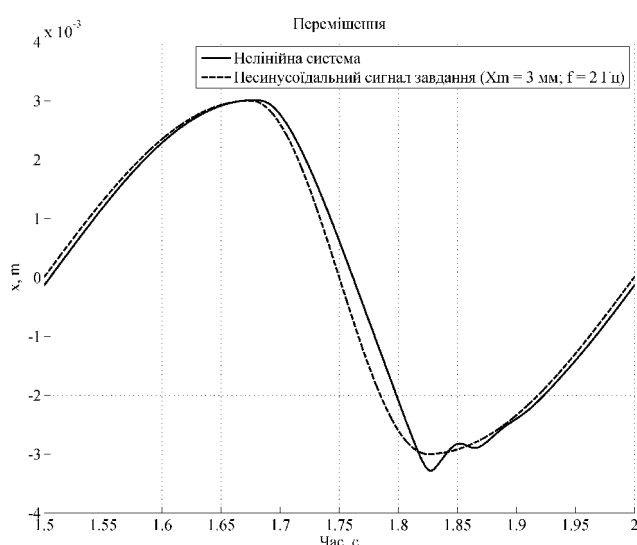


Рис. 3 – Формування закону хитання нелінійною системою гідроприводу

Авторами [9] пропонується методика визначення оптимальних параметрів гармонічного режиму хитання кристалізатора, що враховує величину максимальної деформації заготовки Δu_m . Математично ці умови записуються у вигляді:

$$\frac{\Delta u_m}{A} \geq \frac{4(m-1) \arccos\left(\frac{1}{m}\right)}{3m}, \quad (2)$$

$$\frac{\Delta u_m}{A} \geq \frac{\pi}{m} - 2. \quad (3)$$

де m – індекс випередження, що дорівнює співвідношенню максимальної швидкості гармонічного закону до швидкості розливання V_p ; A – амплітуда гармонічного закону руху кристалізатора. Для пошуку оптимальних параметрів проводилось спільне рішення нерівностей (2) і (3) графічним методом (рис. 4). В результаті встановлено, що максимальному «часу заліковування» ($\tau_N = 0,24T$) відповідає режим хитання кристалізатора з амплітудою $A = 3,6\Delta u_m$ і періодом $T = 4,55(A/V_p)$ [9]. Для визначення оптимальних параметрів закону хитання кристалізатора авторами роботи було прийнято раніше розраховані значення максимальних деформацій «скоринки» заготовки. Для сталі 20 ($\Delta u_m = 0,62 \text{ мм}$) зі швидкістю розливання $V_p = 0,9 \text{ м/хв}$ оптимальною є амплітуда хитання $A = 2,2 \text{ мм}$ і період $T = 0,67 \text{ с}$. Автори відзначають, що в реальних умовах на МБЛЗ Донецького металургійного заводу був встановлений режим хитання кристалізатора близький до розрахункового, при цьому отримано дуже високу якість поверхні заготовки зі сталі ШХ15 [9]. Автором [10] встановлено, що відхилення швидкості розливання від заданого значення може становити $\pm 0,083 \text{ м/хв}$.

Візьмемо за базові значення технологічні параметри, які визначені авторами [9] для сталі 20, та визначимо зміну індексу випередження при зміні швидкості розливання. Отримаємо вираз:

$$\Delta m = \frac{-\omega A \Delta}{V_p(V_p + \Delta)} \quad (4)$$

де Δm – зміна індексу випередження; Δ – зміна швидкості розливання, що становить $\pm 0,083$ м/хв; ω – кутова частота гармонічного закону хитання.

Зміна індексу випередження потребуватиме у відповідності з умовами (2) і (3) перерахувати параметри гармонічного закону хитання. За базовий приймаємо індекс випередження, визначений авторами [9] як оптимальний ($m = 1,38$) – точка перетину кривих 1 і 2 на рис. 4.

Збільшення швидкості розливання на величину Δ призводить до зменшення індексу випередження на величину 0,116 відносно базового. Амплітуду гармонічного закону знаходимо за виразом (3) прирівнявши праву та ліву частину, яка дорівнює 1,27 мм. При зменшенні швидкості розливання амплітуду визначаємо аналогічно, але використовуємо вираз (2) тому що індекс випередження збільшується. Вона становитиме 1,597 мм.

Зміну амплітуди визначаємо, знайшовши різницю між базовою та новими значеннями, які становлять 0,93 та 0,63 мм. В результаті отримуємо, що точність підтримки амплітуди закону хитання системою гідравлічного приводу повинна становити менш ніж 0,63 мм. Даний результат справедливий і для несинусоїдального закону руху [4], оскільки крива переміщення складається з відрізків синусоїд на інтервалі періоду коливань.

Згідно з технологічними вимогами безперервного лиття [4] межі зміни параметрів хитання кристалізатора такі: амплітуда 0...7 мм; частота 1,67...3,3 Гц; коефіцієнт несинусоїдальності 0,55...0,8. Тому для визначення інтегральних показників якості функціонування нелінійної системи виконувалася варіація параметрів відносно базового значення в цих зазначених межах. У результаті встановлено, що найбільший вплив на них має амплітуда сигналу завдання. Залежність показника якості, розрахованого за виразом (1), від амплітуди хитання кристалізатора показана на рис. 5. Характер цієї залежності можна пояснити наявністю в структурі системи елемента типу насичення – гідророзподільника. У межах працездатного стану цей елемент працює на лінійній ділянці. Однак при виході за їх межі – настає його насичення, що призводить до різкого погіршення показників якості регулювання.

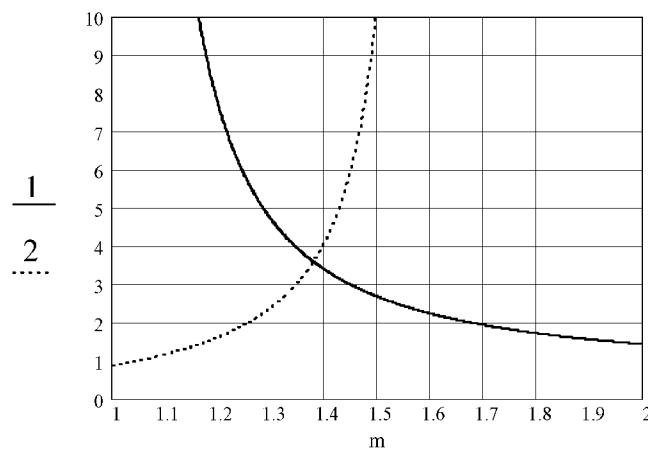


Рис. 4 – Графічне рішення системи нерівностей (3) і (4) через обернені вирази – крива 1 і 2 відповідно.

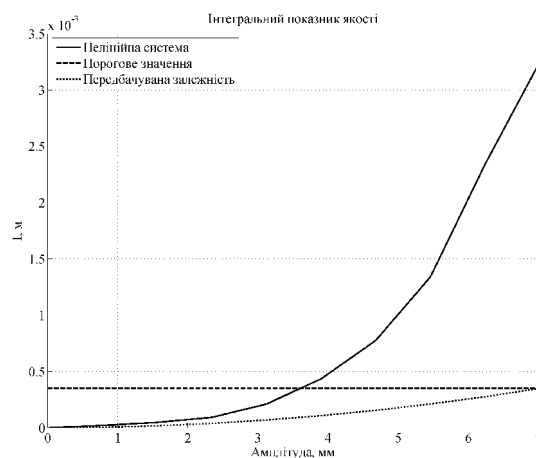


Рис. 5 – Інтегральний показник якості при частоті 2 Гц та коефіцієнті несинусоїдальності 0,7

Було проведено оцінку інтегральних показників якості на основі результатів вимірювань на ПАТ «АМК» розробленою системою моніторингу параметрів хитання кристалізатора МБЛЗ [8]. Це дозволило встановити його порогове значення на рівні $3,5 \times 10^{-4}$ м, при перевищенні якого система вважається непрацездатною. Така точність підтримки амплітуди хитання повністю задовольняє вимоги (2) і (3) тому що менша ніж 0,63 мм.

Наведені вище приклади дають підставу стверджувати, що для систем гідроприводу з П-регулятором, існує свій поріг працездатності. При його перевищенні спостерігається різке погіршення якості функціонування. Для даного випадку, згідно з результатами моделювання, він склав 3,7 мм при допуску 0,35 мм та 4,2 мм при допуску 0,63 мм. Але згідно з технологією безперервного розливання сталі верхній поріг підтримуваної амплітуди складає 7 мм – тому система в цьому випадку буде непрацездатною. Для розширення меж її працездатності потрібно розробити такий алгоритм керування перетворювачем гідроприводу, що зробить замкнену систему інваріантною до нелінійностей в робочому діапазоні. Передбачуваний графік залежності на рис. 5 такої системи наступний: приблизно до 4 мм інтегральний показник якості значно менше порогового значення, далі він зростає і після 7 мм наближається до значення 0,63 мм (у кращому випадку 0,35 мм).

Висновки. Встановлено, що показники якості функціонування САК гідроприводом механізму хитання суттєво залежать від амплітуди хитання, при цьому за умови відтворення несинусоїдального закону зі збільшенням амплітуди хитання точність відтворення заданого закону хитання погіршується випереджаючими темпами. Проектування подібних систем вимагає встановлення порогового значення амплітуди хитання, при перевищенні якого система буде вважатися непрацездатною. В подальшому перспективним вважається розробка керування перетворювачем гідроприводу за критерієм мінімуму інтегрального показника якості з урахуванням у моделі нелінійних властивостей сервоклапану і за умови забезпечення працездатності системи в широкому діапазоні зміни параметрів технологічного режиму хитання кристалізатора МБЛЗ.

Список літератури: 1. Особенности механизмов качания кристаллизатора с гидравлическим приводом / А. Н. Смирнов, О. В. Антыкуз, А. Ю. Цупрун, В. М. Пильгаев. // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: тематичний збірник наукових праць. – 2010. – №1. – С. 290–294. **2.** Zhou S. Modeling and Control of Electro-Hydraulic-Controlled Stepping Cylinder for Mold Oscillation / S. Zhou, M. Xiao, J. Song. // Jinchun. – 2011. – №99. – С. 183–189. **3.** Діденко В. О. Математичне моделювання механізму хитання кристалізатора машини безперервного лиття заготовок з гідравлічним приводом / В. О. Діденко, О. Ф. Бондаренко, О. М. Полено. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – №4. **4.** Some Approaches to Choosing Rational Mold Oscillation Parameters / A. N. Smirnov, O. V. Antykuz, A. Y. Tsuprun, V. M. Pilgaev. // Russian Metallurgy (Metally). – 2008. – №8. – С. 700–705. **5.** Системы управления процессами и механизмами машин непрерывного литья заготовок [Електронний ресурс] / [А. Ю. Цупрун, А. Г. Редько, А. В. Колоколов и др.] – Режим доступу: <http://uas.su/conferences/2010/50let/32/00032.php>. **6.** Direct drive servovalves D633/D634 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.moog.com/literature/ICD/Moog-Valves-D633_D634-Catalog-en.pdf. **7.** Лукас В. А. Теория автоматического управления / В. А. Лукас. – М.: Недра, 1990. – 416 с. **8.** Бондаренко О. Ф. Математична модель обробки даних в системі моніторингу параметрів хитання кристалізатора машини безперервного лиття заготовок / О. Ф. Бондаренко, О. М. Полено, В. О. Діденко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2013. – № 18. – С. 70–76. **9.** Определение параметров качания кристаллизатора МНЛЗ с учетом деформации отливаемой заготовки / В. И. Мачикин, С. П. Ефименко, П. А. Левин, А. М. Кондратюк // Сталь. – 1985. – №4. – С. 22–24. **10.** Огурцов А. П. Производство стали от старта до финиша. Т. 4. Непрерывная разливка стали: монография в 10 т. / А. П. Огурцов. – Днепропетровск: ДГТУ, 2011. – 440 с.

Bibliography (transliterated): 1. Smirnov, A. N. et al. *Osobennosti mekhanizmov kachaniya kristallizatora s gidravlicheskim privodom*. Visnik Donbas'koї derzhavnoї mashinobudivnoї akademii: tematichnij zbirnik naukovih prac' 1(2010): 290-294. Print. **2.** Shou, S., M. Xiao and J. Song. *Modeling and Control of Electro-Hydraulic-Controlled Stepping Cylinder for Mold Oscillation*. Jinchun 99(2011): 183-189. Print. **3.** Didenko, V. O., O. F. Bondarenko and O. M. Polieno. *Matematychni modeliuvannia mekhanizmu khytannia krystalizatora mashyny bezperervnoho lyttia zahotovok z elektrohidravlichnym pryvodom*. Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu 4(2015). Print. **4.** Smirnov, A. N. et al. *Some Approaches to Choosing Rational Mold Oscillation Parameters*. Russian Metallurgy (Metally) 8(2008): 700-705. Print. **5.** Tsuprun, A. Yu et al. *Systemy upravleniya protsessamy u mekhanizmyamy mashyn nepreruvnoho lyttia zahotovok*. Web 19 August 2015 <http://uas.su/conferences/2010/50let/32/00032.php>. **6.** *Direct drive servovalves D633/D634*. Web 19 August 2015 http://www.moog.com/literature/ICD/Moog-Valves-D633_D634-Catalog-en.pdf. **7.** Lukas, V. A. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya*. M.: Nedra, 1990. Print. **8.** Bondarenko, O. F., O. M. Polieno and V. O. Didenko. *Matematychna model obrobky danykh v systemi monitorynhu parametriv khytannia krystalizatora mashyny bezperervnoho lyttia zahotovok*. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI» 18(2013) : 70-76. Print. **9.** Machykyn, V. Y et al. *Opredelenye parametrov kachaniya krystalizatora MNLZ s uchetom deformatsyy otyvaemoy zahotovky*. Stal' 4(1985) : 22-24. Print. **10.** Ohurtsov, A. P. *Nepreruvnaia razlyvka staly. Proyzvodstvo staly ot starta do fynysha: monohrafyia v 10 t.* Dneprodzerzhinsk : DSTU, 2011. Print.

Поступила (received) 28.08.2015